

第3章

プリント基板による熱対策技術

―― FPGAの熱の半分以上はボードから逃がすことができる

水科秀樹，芳賀 知，上谷 純

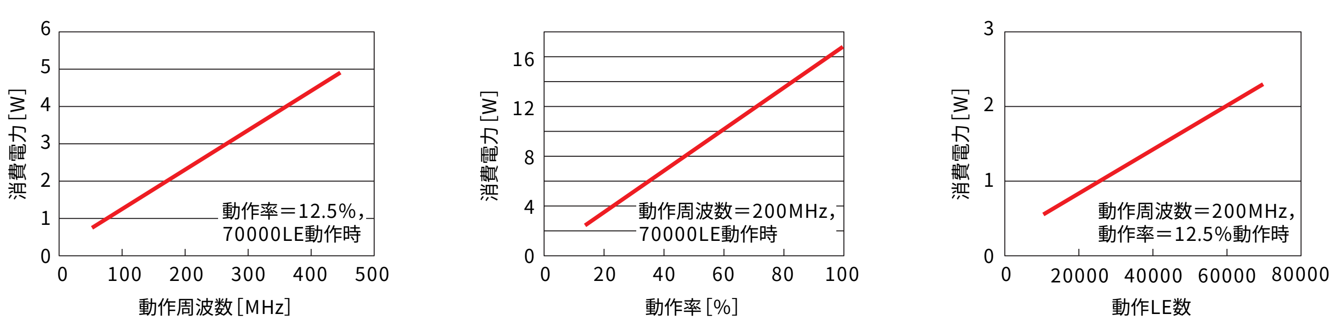
ここでは，FPGAの熱対策をプリント基板によって行うための基礎技術を解説する．初めに，電子機器における熱の流れを説明し，そのあとでFPGAボードの熱対策事例を紹介する．FPGAでよく使われるBGAパッケージは端子からプリント基板への熱伝導が比較的良く，プリント基板の設計しだいではFPGAの熱の50%以上をプリント基板から逃がすことができるという．（編集部）

FPGAの高速化，高機能化が進んでいます．最新のFPGAには，大規模なプログラマブル論理ブロックのほか，さまざまな機能ブロック（積和演算ブロックやクロック管理ブロック，メモリ，高速伝送に対応したI/Oブロックなど）が搭載されています．

しかしFPGAは，万能なデバイスになったとは言えません．大規模とは言ってもFPGAの持つ論理ブロック数には上限があり，当然この回路規模が制約条件になります．せっかくの機能を使いきれなかったり，回路の削減を迫られたりする場合もあります．そして，FPGAが高速化，高機能化したために新たに現れた大きな制約条件が存在します．それが消費電力による熱的な制約です．

● 熱の問題がFPGAの回路性能や機能向上を阻害

FPGAの消費電力は，一般的なディジタルLSIと同様に，おもに動作周波数や動作率，動作回路規模（基本論理ブロック数やI/O数）の三つに依存しています．図1は，FPGAベンダが提供する消費電力見積もりツールを用いて，3要因をパラメトリックに振った場合の消費電力の変化の例をグラフで示したものです．動作周波数や動作率，動作回路規模が上がれば，それらに比例して消費電力が増大すると言えます．



（a）動作周波数と消費電力　（b）動作率と消費電力　（c）動作LE数と消費電力

図1　FPGAの消費電力を決定する3要因

Altera社のStratixファミリの中の「EP1S80」をターゲットとして，スタンバイ電流をTypicalに設定して，内部コアの消費電力を見積もった例を示す．FPGAの消費電力は，一般的なディジタルLSIと同様に，おもに動作周波数や動作率，動作回路規模（基本論理ブロック数やI/O数）の三つに依存していることがわかる

KeyWord　プリント基板，熱対策，FPGA，ジャンクション温度，熱抵抗，熱伝導，対流，放射，BGA，放熱特性，等価熱伝導率，熱コンダクタンス，層数，層厚，銅残存率

図1の例では,最大で17W近い消費電力となっています.消費電力が大きくなりすぎると,FPGAの温度が上昇し,制限温度を超えてしまいます.このような場合,動作周波数を下げたり(性能を下げる),回路規模を抑えたり(機能を削る)と,苦労して設計した回路をスペックダウンさせる状況に陥ります.最悪の場合には,上流の方式そのものの見直しが必要になる場合も考えられ,大きな手戻りになります.

このように,熱の問題がFPGA設計者にとって大きな制約となってきています.

● ジャンクション温度を下げる

熱の問題は,多くの場合,FPGAそのもののジャンクション温度の最大値(T_{jmax})に起因します.とくに標準温度品のT_{jmax}はおおむね85℃と,一般的なLSIと比較すると低くなっています.このため,FPGAでは熱の問題が顕在化する場合も多くなっています.

FPGAのジャンクションの温度を下げるためのアプローチとして,次の二つが考えられます.

①FPGAの消費電力を小さくする

②熱抵抗を小さくする

FPGAの消費電力を小さくすることは,「発生する熱そのものを抑える」ということに相当します.具体的には前述したとおり,スペックダウンせざるをえないでしょう.

熱抵抗を小さくするというのは,「発生した熱を処理する」ということに相当します.FPGAのパッケージ(ケース)と周囲温度の熱抵抗を小さくするために,熱対策(放熱性の改善,改良)を行うことです.

1 電子機器における熱の流れ

FPGA搭載プリント基板の熱対策を検討するためには,基本的な熱の伝達形態と電子機器における熱の流れを理解しておく必要があります.

● 熱の伝達形態

電子機器における熱の流れを図2に示します.プリント基板とそれに搭載されるFPGA,筐体,外気の範囲において,熱の流れおよび空気の流れを模式化したものです[(1)].熱の伝達形態には下記の3種類があります.

1) 熱伝導

熱伝導とは,物質の中を温度の高いほうから低いほうへ熱が伝わる流れのことです.一般に金属などでは熱が伝わりやすく,プラスチックなどでは熱が伝わりにくいとされています.

2) 対流

対流は,周囲空気の流れによる熱の伝達です.温度の高い空気が上昇する(浮力)ことによる自然対流と,ファンなどによって強制的に空気の流れを作り出すことによる強制対流の2種類があります.

3) 放射

放射(ふく射)は,発熱体表面から電磁波によって熱が放射される現象のことを言います.

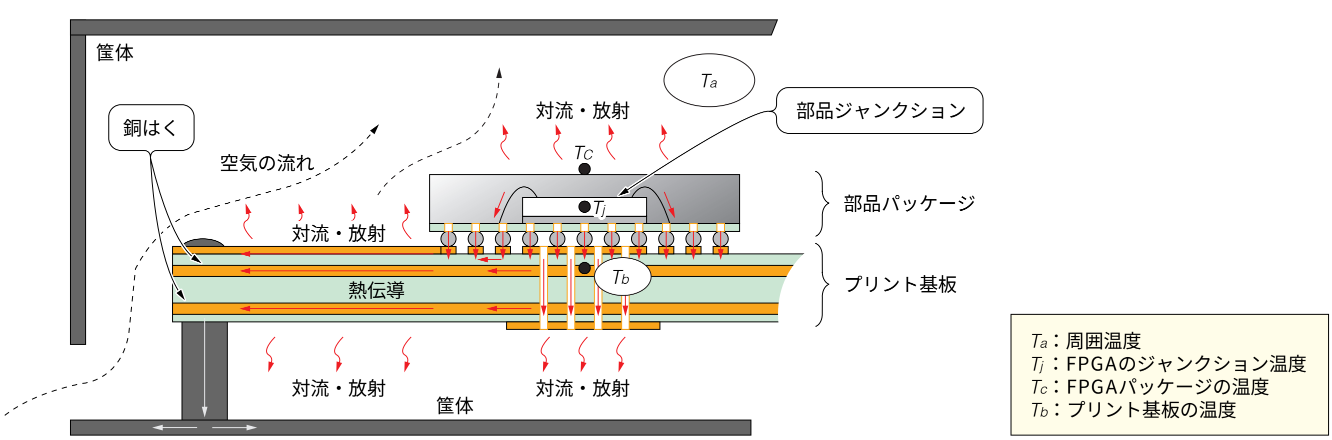


図2 電子機器における熱の流れ

プリント基板とそれに搭載されるFPGAや筐体,外気の範囲において,熱の流れおよび空気の流れを模式化したもの.熱伝導,対流,放射の三つの伝達形態がある



● パッケージ表面とプリント基板から熱を放出

図2を見ると，FPGAから発熱した熱は，いくつかの経路を通って，最終的には外気に放出されることがわかります．ここで重要なことは，熱の逃げる経路としては大きく

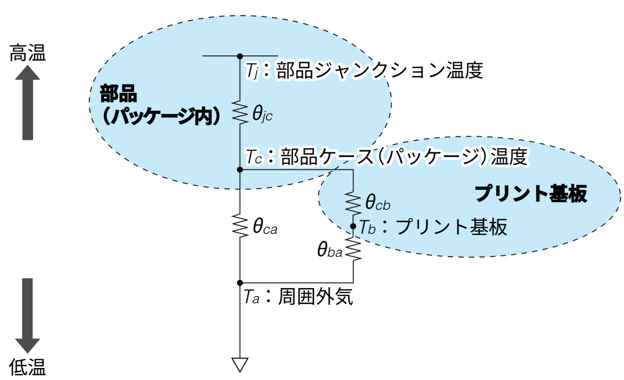
- 発熱体であるFPGAのパッケージ表面から対流や放射で逃げる
- FPGAからプリント基板に熱伝導で伝わって，それからプリント基板の表面から対流や放射で逃げる

の二つがあるという点です．

このことを式で示すと以下のようになります．ここで，パッケージ(ケース)-周囲間熱抵抗θ_{ca}，ジャンクション-ケース間熱抵抗θ_{jc}，FPGAの消費電力P，ジャンクション温度T_j，ケース温度T_c，周囲温度T_aとします．

$$\theta_{ja} = \theta_{jc} + \theta_{ca} \quad [°C/W]$$
$$\theta_{ca} = (T_c - T_a)/P \quad [°C/W]$$
$$\theta_{jc} = (T_j - T_c)/P \quad [°C/W]$$

熱抵抗回路では，θ_{ca}注1に並列に，プリント基板(温度)T_bを経由するθ_{cb}(パッケージとプリント基板の間の熱抵抗)，θ_{ba}(プリント基板と周囲の間の熱抵抗)の二つの和を入れた形を考える必要があります(図3)．ここで，θ_{ca}は，ほぼFPGAの種類によって決まりますが，$(\theta_{cb} + \theta_{ba})$は，プリント基板との実装方式，およびプリント基板の放熱特性の影響を強く受けることになります．



θ_{jc}：部品ジャンクション-部品ケース(パッケージ)間の熱抵抗[°C/W]
θ_{ca}：部品ケース-周囲間の熱抵抗[°C/W]
θ_{cb}：部品ケース-プリント配線板間の熱抵抗[°C/W]
θ_{ba}：プリント配線板-周囲間の熱の抵抗[°C/W]
T(各箇所の温度)の単位は°C

図3　熱抵抗回路

θ_{ca}に並列に，プリント基板(温度)T_bを経由するθ_{cb}(パッケージとプリント基板の間の熱抵抗)，θ_{ba}(プリント基板と周囲の間の熱抵抗)の二つの和を入れた形を考える

● FPGAの発熱対策はプリント基板がポイント

最近のFPGAのパッケージは，BGA(ball grid array)が主流になっています．BGAは，QFP(quad flat package)と比べてプリント基板への熱の伝わりやすさ(熱コンダクタンス)が増大します．これはリード部の断面積と長さから計算しても明らかです．同じリード材料で同じピン数としたとき，断面積/長さで比較すると2倍～5倍程度も違います．つまり，最近のFPGA-プリント基板間の熱伝導は良好と考えることができます．

もしプリント基板の放熱特性が良ければ，FPGAで発熱した熱のかなりの部分(場合によっては50%以上)を熱伝導でプリント基板側に伝えることができるとされています．したがって，FPGAの放熱対策は，プリント基板で行うのがもっとも効果的ということになります．そしてこのためには，プリント基板そのものの放熱特性を十分に把握しておく必要があります．

2 プリント基板の放熱特性

プリント基板の放熱特性を決めるのは，

- プリント基板の熱伝導特性
- プリント基板から外気への対流による熱伝達特性と放射特性

の二つです．

一般に，熱伝導特性が良好であれば，プリント基板の温度は均一化され，周辺温度が上昇し，対流と放射によって運ばれる熱流量も大きくなります．したがって，プリント基板の放熱特性を左右するのは，おもに熱伝導特性という

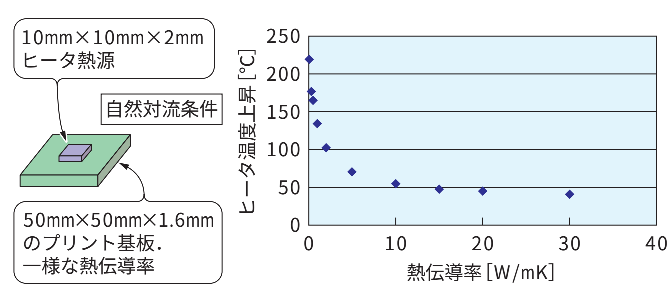


図4　熱伝導率と温度上昇の関係

熱解析シミュレータで求めた結果を示す．熱源は1.9W

注1：θ_{ca}には，熱抵抗測定時のプリント基板の$\theta_{cb} + \theta_{ba}$がすでに並列に含まれている．厳密な$\theta_{ca}$はその並列回路を除いたもの．

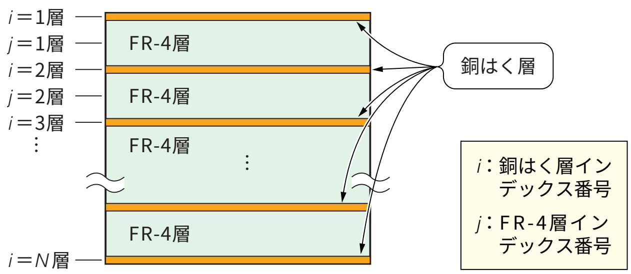


図5 プリント基板の断面
銅はくの層と絶縁層を交互に積み重ねた構造になっている

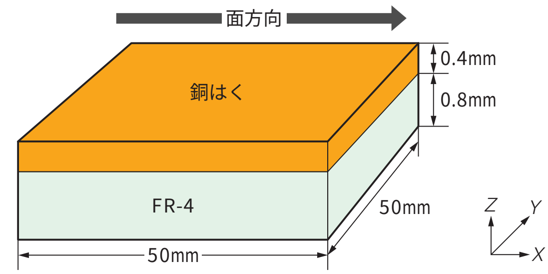


図6 面方向等価熱伝導率
0.4mm厚の銅はくと0.8mm厚のFR-4基材が積層された50mm角のプリント基板の例．矢印方向は，銅はくとFR-4材の並列回路になる

ことができます．図4に熱伝導率と温度上昇の関係を3次元熱流体解析(熱解析シミュレータ)で求めた結果を示します．

次に，プリント基板の熱伝導特性を理解することにしましょう．

● プリント基板の基本熱伝導特性

プリント基板は，一般には板(プレート)状の形状をしています．熱伝導率を考える場合，熱伝導率の大きい銅の層と熱伝導率の小さい樹脂絶縁層のシートを積層したものであるため，方向によって熱の伝わりかたが異なります．言い換えれば，プリント基板の熱伝導性は異方性(面方向と直交方向の二つの熱伝導率．面方向，直交方向は，それぞれX-Y方向，Z方向とも言う)を持っているのです．

図5は，プリント基板の断面の構造を示しています．銅はくの層と絶縁層を交互に積み重ねた構造になっているため，方向ごとに各ブロックの熱コンダクタンスを計算する必要があります．

電気の世界で言うと，熱伝導率は電気伝導度に相当します．直方体の物体においては，これに断面積を掛けてから長さで割ったものが熱コンダクタンスになります．材料の異なるブロックごとに熱コンダクタンスを求めてから，それらを合成し，合成後の熱コンダクタンスに全体の長さを掛けて，断面積で割ると，等価的な熱伝導率が得られます．

例として，方向別に等価熱伝導率の計算を行ってみましょう．

● 面方向等価熱伝導率の算出例

0.4mm厚の銅はくと0.8mm厚のFR-4基材が積層された50mm角のプリント基板において，面方向等価熱伝導率を算出してみます(図6)．ここでλ_{cu}は銅の熱伝導率で値を398W/mKとし，λ_{fr4}はFR-4の熱伝導率で0.38W/mKとします．

矢印方向の合成熱コンダクタンスGは，並列回路となるため，

$$G = G_1 + G_2$$
$$G_1 = \lambda_{cu} \times 断面積/長さ$$
$$= (398 \times 0.05 \times 0.0004) / 0.05$$
$$G_2 = \lambda_{fr4} \times 断面積/長さ$$
$$= (0.38 \times 0.05 \times 0.0008) / 0.05$$
$$G = 398 \times 0.0004 + 0.38 \times 0.0008$$

複合形状(全体)としての(断面積/長さ)は，

$$(0.05 \times 0.0012) / 0.05 = 0.0012$$

であるので，Gをこれで割ると，複合材としての等価熱伝導率は，

$$G / 0.0012$$
$$= (398 \times 0.0004 + 0.38 \times 0.0008) / 0.0012$$
$$= 132.9 \ [\mathrm{W/mK}]$$

一般に，面方向の全体面積に対する銅の面積比率を銅残存率と呼びます．ビアやスルー・ホール注2がまったくないものと仮定し，銅層の面方向熱伝導率は，その層の銅残存率にλ_{cu}を掛けたものであるとした場合，面方向等価熱伝導率の一般式(2)として，

注2：ここでのビアとは，層間の接続のために配置され挿入部品のリードを取り付けない穴を言う．これに対して，スルー・ホールは，部品のリードを挿入固定するとともに層間接続を行うことを目的とする穴を指す．ビア，スルー・ホールいずれも穴内壁が導体であり，通常，その導体には電気伝導性の高い銅が使用されている．

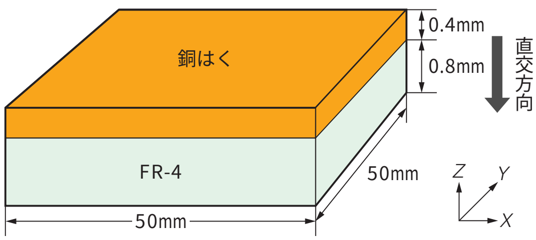


図7　直交方向等価熱伝導率

0.4mm 厚の銅はくと 0.8mm 厚の FR-4 基材が積層された 50mm 角のプリント基板の例．矢印方向は，銅はくと FR-4 材の直列回路になる

（銅はく層の銅残存率が1のときの直交方向等価熱伝導率 [W/mK]）

$$= \frac{\lambda_{cu} \cdot \lambda_{fr4} \cdot T_{total}}{\Sigma_i \left(T_{cui} \cdot \lambda_{fr4}\right) + \Sigma_j \left(T_{fr4j} \cdot \lambda_{cu}\right)}$$

T_{total}：トータル厚み [m]　　λ_{fr4}：FR-4の熱伝導率 0.38 [W/mK]

T_{cui}：i層の厚み（図5中）[m]　　λ_{cu}：銅の熱伝導率 398 [W/mK]

T_{fr4j}：j層の厚み（図5中）[m]

図8　直交方向等価熱伝導率の一般式

銅はく層の銅残存率を 1 で固定とした場合

プリント基板の面方向の等価熱伝導率

＝Σ（層の熱伝導率×層の厚さ / 層のパターン残存率）

/ プリント基板全体の厚さ

が広く使われています．

● 直交方向等価熱伝導率の算出例

プリント基板の寸法はそのままで，上から下へ伝わる場合の，直交方向等価熱伝導率を求めてみます（**図7**）．

矢印方向の熱コンダクタンス G は直列回路となるため，

$$1/G = 1/G_1 + 1/G_2$$

$$G_1 = \lambda_{cu} \times 断面積/長さ$$
$$= (398 \times 0.05 \times 0.05) / 0.0004$$

$$G_2 = \lambda_{fr4} \times 断面積/長さ$$
$$= (0.38 \times 0.05 \times 0.05) / 0.0008$$

$$G = (398 \times 0.38 \times 0.05 \times 0.05) / (398 \times 0.0008 + 0.38 \times 0.0004)$$

複合形状としては，$(0.05 \times 0.05) / 0.0012$ であるので，これで割ると，複合材としての等価熱伝導率は，

$$(398 \times 0.38 \times 0.0012) / (398 \times 0.0008 + 0.38 \times 0.0004)$$
$$= 0.57 \ [\mathrm{W/mK}]$$

（直交方向の熱伝導率）

$$= \frac{(0.00025^2 \times \pi) \times 398 + (0.0008^2 - 0.00025^2 \times \pi) \times 0.38}{0.0008^2}$$

$$= 122.4 \ [\mathrm{W/mK}]$$

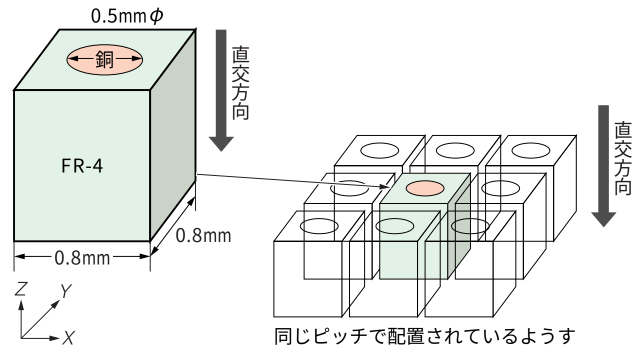


図9　ビア・モデルにおける等価熱伝導率

50mm 角の FR-4 基板に縦横とも 0.8mm ピッチで直径 0.5mm の銅の円柱が埋め込まれている場合

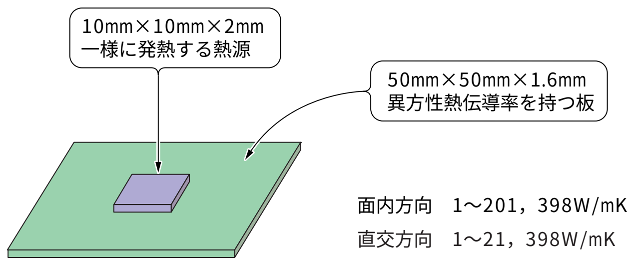
銅はく層の銅残存率を 1 で固定とした場合，直交方向等価熱伝導率の一般式は**図8**のようになります．

● 直交方向のビアの影響の算出例

50mm 角の FR-4 基板に，縦横とも 0.8mm ピッチで直径 0.5 mm の銅の円柱が埋め込まれている場合の直交方向の等価熱伝導率を求めてみましょう（**図9**）．

FR-4 の層に銅の円柱を直交方向に配置した場合の等価熱伝導率は，面方向の計算方法を 90 °回転させて考えることで，同様に概算できます．直交方向の一つのブロックを示し，このブロックの上から下への等価熱伝導率を計算します．この単位ブロックが面方向に繰り返される場合の全体の等価熱伝導率は，一つのブロックで計算した値と同じ値になります．ここで，ビアの内部は空洞であるため，分母および分子の銅の面積から空洞部分の面積を差し引けば，より厳密な値となります．また，この例において円柱（銅）以外の部分が単一の FR-4 ではなく，銅と FR-4 の多層構造である場合には，多層構造の部分を直交方向等価熱伝導率の例に従って算出した後に，その値を**図8**の式中の λ_{fr4}（＝0.38W/mK）の代わりに使用することで概算できます．

これらの計算例から注目すべきところは，プリント基板特有の構造上，面方向の値は比較的大きくなるが，直交方向の値は小さくなっている点です．面方向と直交方向の結果の値を比較すると明らかです．また，直交方向とビアがある場合の値の比較から，直交方向の熱伝導率は，ビアまたはスルー・ホールがまったくない場合にはかなり小さく



●条件

セラミック・ヒータ	10mm × 10mm × 2mm
熱伝導シート	10mm × 10mm × 0.5mm
プリント配線板	50mm × 50mm × 1.6mm
空冷条件	自然対流条件
放射率	一律0.9(ヒータ，異方向性板，銅の放射率もすべて0.9とした場合の解析であることに注意)

図10　異方性熱伝導率と温度上昇の関係を調べるモデル
50mm角のプリント基板の中央にヒータを搭載し，伝導，対流，放射を考慮して自然対流条件で定常解析から温度上昇を調べる

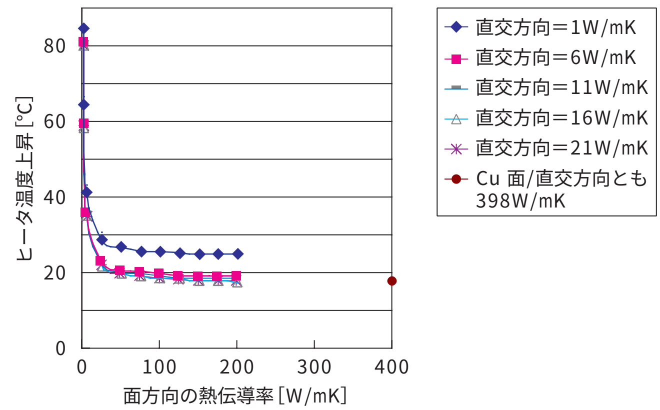


図11　面方向熱伝導率とヒータの温度上昇
直交方向熱伝導率を固定している

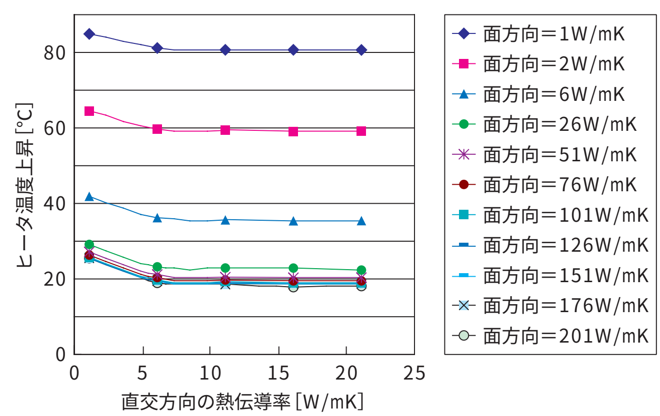


図12　直交方向熱伝導率とヒータの温度上昇
面方向熱伝導率を固定している

なりますが，それらを追加すると値は良くなると言えます．

● 異方性熱伝導率が温度上昇へ与える影響

　さて，この異方性熱伝導率の値と温度上昇の関係はどのようになるのでしょうか？

　プリント基板の異方性熱伝導率と温度上昇の関係を把握するために，熱伝導率の異方向性を持つ板で考えてみます．手計算では無理なので，熱解析シミュレータで求めることにします．50mm角のプリント基板の中央にヒータを搭載し，伝導や対流，放射を考慮して自然対流条件で定常解析から温度上昇を調べた結果を紹介します．解析モデルの寸法や条件は図10のとおりです．

　この解析では，面方向熱伝導率と直交方向熱伝導率を変化させてみました．2者の値の組み合わせで1Wの熱源の上面中央で周囲温度20℃からの温度上昇をプロットした結果を図11と図12に示します．

　図11は，直交方向熱伝導率を固定し，面方向熱伝導率を変化させた場合の温度上昇への影響です．だいたい50W/mKより小さい領域では，大きく温度が変わりますが，それより大きくなると飽和してくることがわかります．また，図12の面方向を固定としたときの直交方向熱伝導率の影響も，同じく約7W/mKくらいで飽和しています．どちらの影響が大きいかは実際のプリント基板により異なると考えられます．

　また，これらの解析結果は，面方向・直交方向ともに，ある程度以上の領域に入ると，たとえ大きく熱伝導率を上げたとしても，あまり温度低減が見込めなくなることを示しています．これは，プリント基板ごとに最適な対策があることを示します．

● プリント基板の一般的な熱対策の考えかた

　実際の熱対策事例を示す前に，これまで述べてきたことを踏まえて，プリント基板で熱対策を行ううえでの一般的な考えかたをまとめます．

　プリント基板上で熱対策する場合は，基板の仕様やパターン配線を決定する際に，図13に示す点に配慮する必要があります．

　図13の①～③は，熱伝導率の計算例や解析例から，もうおわかりのことと思います．④については，リード部につながっているパターン，つまりパッドの面積を拡げたり，



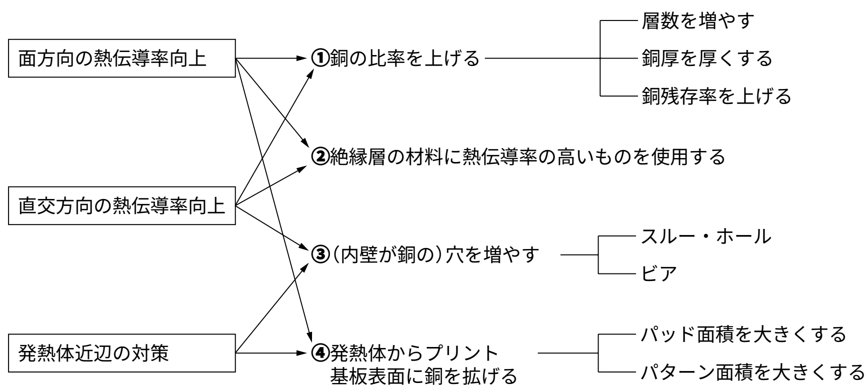


図13
プリント基板による熱対策の基本
面方向あるいは直交方向の熱伝導率を向上させるか，発熱体付近のパターンなどで対策する

表1　FPGAボードの仕様

プリント基板サイズ	150×150×1.6(mm)
絶縁材	FR-4
層　数	2層
搭載回路	Altera社Stratixファミリ「EP1S10」672ピンFBGAパッケージおよび周辺回路(電源，表示など)
動作条件	66MHz，シフト・レジスタ動作7000LE
消費電力	約1.5W
空冷条件	自然対流条件，プリント基板水平置き

パターンそのものの配線幅を大きくしたりという方法であり，これらも効果があります．単純に熱伝導だけによるものではなく，対流の影響も含んでいます．つまり，発熱体から対流に寄与する表面まで，その熱伝導率をなるべく高く保ち，かつ，対流の実効面積を増やすには，発熱体から銅を拡げていくのが最善です．

3 FPGAボードの温度低減事例

ここではプリント基板の対策だけで，FPGAボードにおいてどのくらいの温度低減が可能であるかを示します．

FPGAボードの熱設計では，大きな発熱源であるFPGAの制限温度T_{jmax}を越えないようにすることが必須条件となります．T_{jmax}と実際の温度の差は「温度マージン」になります．この温度マージンが大きいほど，周囲温度条件に対して許容度が増すことになります．この結果，強制冷却などによる追加コストを下げることができると考えられます．冷却用ファンを取り除くことができれば，コストのみならず騒音や信頼性の問題も解消でき，システム全体の消費電力を抑えることも可能となります．

表1に，対策を実施する前のFPGAボードの仕様を示します．このボードはFPGAの評価用に作られたものです．FPGAは，米国Altera社のStratixシリーズの「EP1S10F672」を搭載しています．I/Oピンから表示LEDやスイッチなどへの接続があるだけで，多くは未接続です．

銅厚35 μmの2層板(**写真1**)で作成したところ，冒頭に述べたジャンクション温度の制約から，動作周波数66MHzで7000LEしか動作させることができませんでした．

回路図や部品の配置位置，プリント基板の厚さ(1.6mm)，プリント基板の大きさ(150mm×150mm)については変更できないという制約があるという状態から，熱対策を実施していく必要がありました．

● 対策1：配線する銅の層を2層から10層に変更する

プリント基板の熱伝導率を上げるために，直交，面両方向で効果がある対策として，銅の層を厚くするか，銅の層数を増やすかの二つが考えられます．

今回の評価では，標準の材料を活用した対策を前提とするため，層数追加を採用し，10層構成としました．

● 対策2：配線する層の銅残存率を上げる

配線する層の銅残存率を上げることは，面方向の熱伝導率の向上に寄与します．場合によって，以下の三つの方法のどれかを用います．

1) パッドを拡張(スプレッド)する

FPGAに接続されているパッドそのもの，あるいはそれに接続されているネットが持つ表層上の銅の面積を大きくして，対流に寄与する面積を増やします．

2) 電源，グラウンドのネットを拡張する

FPGAは，電源/グラウンド用のピン数がほかのピンの数に対して比較的多いので，これらに接続されるネットの

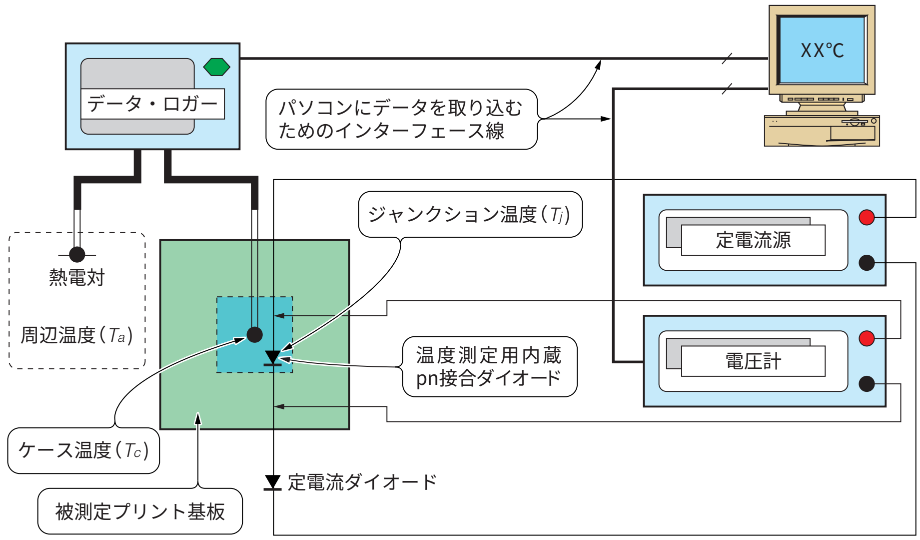
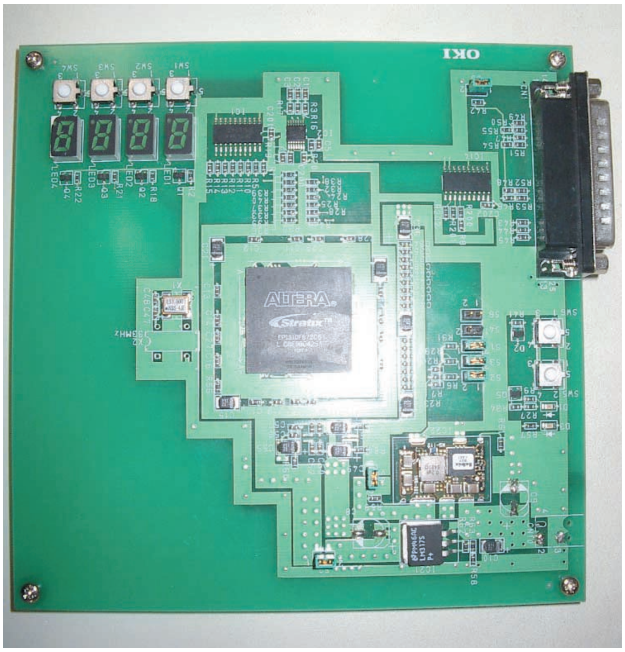
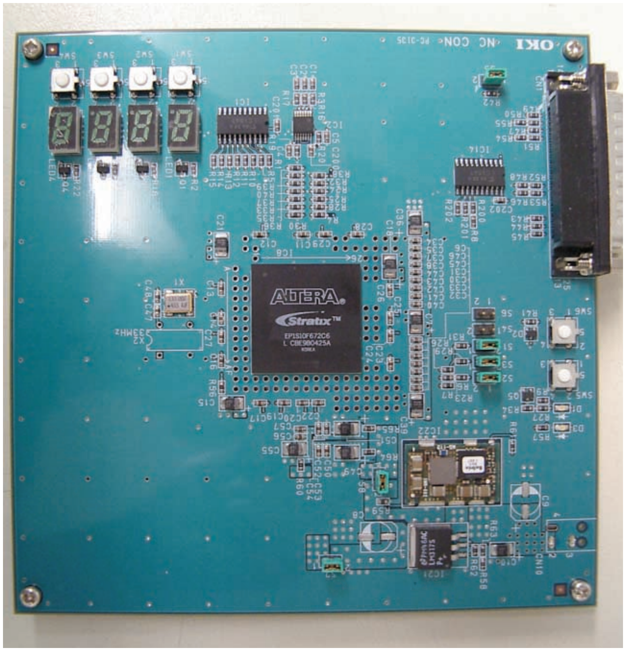


図14
ジャンクション温度とパッケージ温度の測定
FPGAに用意されている温度観測用ダイオード端子によりジャンクション温度を測定する．熱電対とデータ・ロガーを用いてパッケージの温度を測定する．プリント基板上面の温度分布のようすを確認するために，サーモグラフィを用いる



(a) 対策前



(b) 対策後

写真1　熱対策の評価に用いたFPGAボード
対策前は2層板，対策後は10層板である．回路と部品配置，プリント基板の厚さや大きさは同一

コラム　FPGA内のジャンクション温度を知る方法

最近の高性能FPGAファミリには，チップ・ジャンクション温度T_j観測用の端子が用意されるようになりました．半導体メーカは以前から熱抵抗用TEG（test element group）によりT_jを測っており，これがユーザに開放されたものと見ることができます．マイクロプロセッサの世界ではかなり前から一般的になっていましたが，FPGAへのCPUコアの内蔵が始まり，両者の境界がなくなってまもなく，FPGAでもサポートされるようになったと思われます．

温度観測用の端子は2本あり，極性を持っています．これらは内部の専用ダイオードに接続されており，一定電流を流した場合の電圧の温度特性により，ジャンクションそのものの温度を間接的に知ることができます．

表面積を増やします．熱容量も増えるので，動的に消費電力が変化する際も，その増加に対して温度が上昇しにくくなります．

3）銅パターン周辺に銅べたを形成する

信号線が配線されている周辺部にべたを重ねて形成します．これも銅残存率向上に効きます．この場合，信号線とべたのクリアランスは極力小さくします．当然のことながら離れるほど熱は伝わりにくくなるためです．

● 対策３：熱源周辺にスルー・ホールやビアを多数設置

図12の例で示される直交方向の熱伝導率を飽和領域に近づけるため，スルー・ホールまたはビアを熱源周辺に多く設ける必要があります．

● 対策４：ハロゲン・フリーFR-4材を用いる

絶縁層に用いる材料を一般のFR-4材からハロゲン・フリーFR-4材に置き換えます．先ほど述べたように，メーカ提供のカタログ値上で約2倍の熱伝導率を持つ絶縁材に置き換えることにより，絶縁層の熱伝導向上をねらいます．

● 対策結果

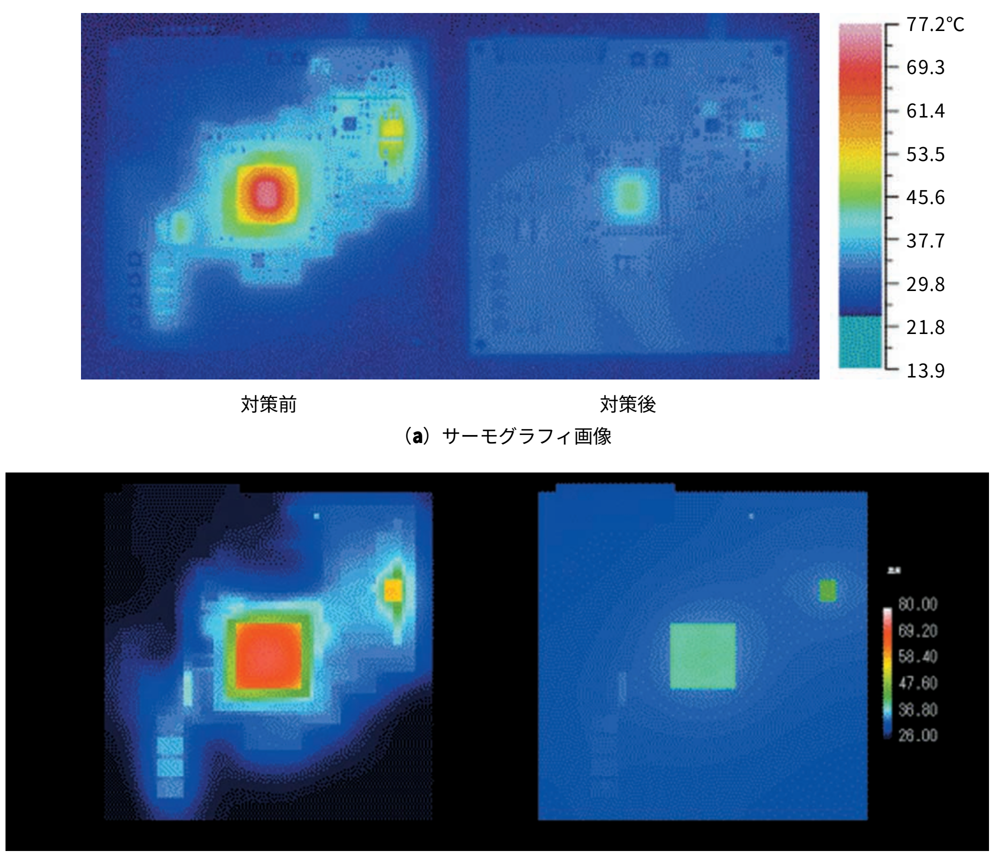
対策前後におけるスポットとしての温度比較は，以下の2ヵ所で行いました．

①FPGA内のジャンクション温度
②FPGAパッケージ

①の測定には，FPGAに用意されている温度観測用ダイオード端子を利用しました（p.57のコラム「FPGA内ジャンクションでの温度を知る方法」を参照）．②については熱電対とデータ・ロガーを用いました．また，プリント基板上面の温度分布のようすを確認するため，サーモグラフィでも観測しました（図14，写真1）．

結果の熱画像および解析温度コンタ（等温線表示）を図15に示します．

結果の温度分布を見ると，FPGAパッケージ表面の温度



対策前　対策後
（a）サーモグラフィ画像

対策前　対策後
（b）熱解析の結果（温度コンタ）

図15
温度測定と熱解析結果
FPGAパッケージ表面の温度は，対策後のプリント基板のほうが低くなっていることがわかる

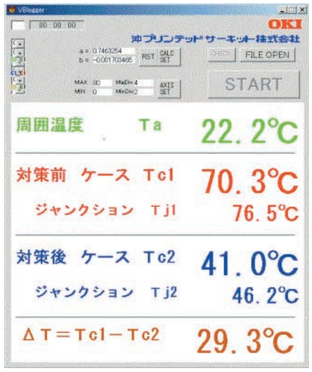


図16　ジャンクション温度とパッケージ温度の表示
パソコン上で表示するプログラムのウィンドウ

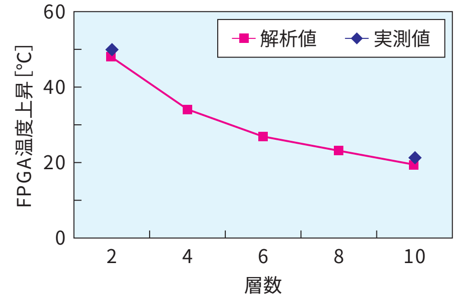


図17　層数による温度の違い
熱解析シミュレータを用いて各層数について調べた結果を示す

は，対策後のプリント基板のほうが低くなっています．しかし，周辺のプリント基板の温度，とくにプリント基板の端部（FPGAから遠い箇所）では，むしろ，対策後のほうが温度が高くなっています．これは，対策後のプリント基板は，表層にべたを形成し，銅残存率が1に近くなっているからです．温度が低かった場所の温度を上げ，温度が高かった場所の温度を下げ，全体の温度を均一化することを「均熱化」と言いますが，本事例はよく均熱化されているといえるでしょう．**図16**は両者のジャンクション温度とパッケージ（ケース）温度を示す表示プログラムのウィンドウです．今回のプリント基板においてプリント基板の部分を置き換えただけで，実にFPGAパッケージについて約30℃の温度低減がなされたことを示しています．

今回は，層数を2層から10層に変えましたが，その間の層数では温度がどのようになるのでしょう．熱解析シミュレータを用いて確認してみます．各層数で何℃になるかについて，シミュレーションを行った結果を**図17**に示します．製品化する際はコストのつごう上，むやみに層数を増やすことはできませんから，コストと温度低減の兼ね合いから層数を選択するべきでしょう．

電子デバイスの発熱に対する放熱対策は，プリント基板の熱伝導を活用することが基本です．本稿では，FPGA搭載プリント基板の熱対策について解説し，一般的なプリント基板でも熱伝導性に配慮して層構成およびパターンを設計すれば，大きな放熱効果が得られる事例を示しました．

巨大なヒートシンクや強制空冷方式を安易に採用する前に，プリント基板の配慮で，どこまで温度上昇を抑えられるのかを考えてみましょう．案外と簡単に，スペース削減やコスト削減などが見込める場合があるかもしれません．

参考・引用*文献

(1) 石塚 勝；電子機器の熱設計基礎と実際，pp.18-19，丸善，2003年．
(2) 国峰尚樹；エレクトロニクスのための熱設計入門，pp.127-128，日刊工業新聞社，1997年．
(3) 水科秀樹；プリント基板による熱対策，熱設計・対策技術シンポジウム，G4-2-1-G4-2-17，日本能率協会，2005年．

みずしな・ひでき
はが・さとる
かみや・じゅん
沖プリンテッドサーキット（株）

<筆者プロフィール>
水科秀樹．沖電気工業に入社し，ミニコン周辺機器およびシステムLSI開発に従事．その後，現所属にてプリント基板関連の熱解析および熱技術開発に従事．
芳賀 知．沖電気工業に入社し，情報機器・システムの開発を経験後，EMC設計技術の技術開発に従事．超先端電子技術開発機構（ASET）を経て，2004年から現所属．同時に放熱技術の開発にも従事．
上谷 純．沖プリンテッドサーキットに入社し，プリント配線板実装設計およびプロセス開発を経験後，プリント基板関連の熱解析および熱技術開発に従事．